



JAPANESE PATENT OFFICE

IDS

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number: 06249624

(43)Date of publication of application: 09.09.1994

(51)Int.Cl.

G01B 11/24

(21)Application number:
05035634

(71)Applicant:

OPTON CO LTD

(22)Date of filing: 24.02.1993

(72)Inventor:

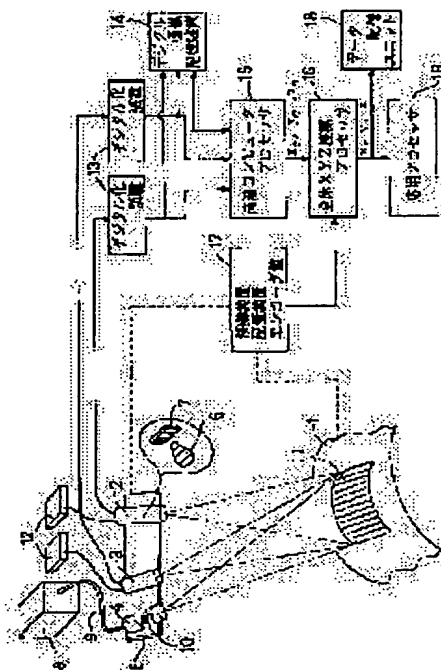
JIYON EMU FUITSUTSU

(54) INSTRUMENT FOR MEASURING THREE-DIMENSIONAL SURFACE SHAPE

(57)Abstract:

PURPOSE: To execute dimension measurement, surface inspections, and reverse CAD functions on an object to be measured by accumulating the XYZ coordinate data of the surface section of the object at a high speed.

CONSTITUTION: The title instrument is provided with a projector 4 which projects the surface section of an object 1 to be measured with a fringe pattern and camera units 2 and 3 which receive reflected light from the surface section and the visual axis of the camera unit 2 is deflected from that of the projector 4 by 19° to 90°. The visual axis of the camera unit 3 is deflected from that of the camera unit 2 by at least 3°. In addition, the camera unit 2 sends first electric signals representing the reflected light received by the unit 2 and the camera unit 3 sends second electric signals representing the reflected light received by the unit 3.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 07.01.2000

[Date of sending the examiner's decision
of rejection]

[Kind of final disposal of application other
than the examiner's decision of rejection
or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of requesting appeal against
examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998 Japanese Patent Office

特開平6-249624

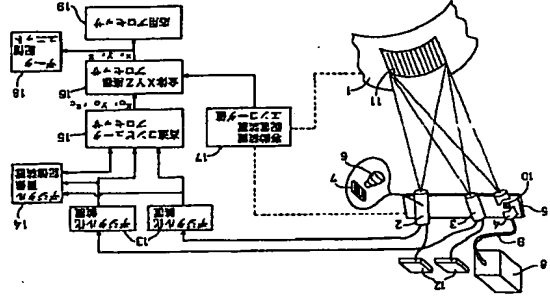
(43)公開日 平成6年(1994)9月9日

(51)Int. Cl.⁶ G 01 B 11/24 識別記号 F I 庁内整理番号 C 9108-2 F 技術表示箇所

発明者	特開平5-35634	出願人	000150213
平城5年(1993)12月24日		株式会社オプトン	
		愛知県瀬戸市次田町970番地の2	
		ジョン エム フィッツ	
		アメリカ合衆国、カリフォルニア州 9	
		0402、サンタ モニカ、ユークリッド	
		ストリート 528	
		弁理士 足立 勉	

(54)【発明の名称】 3次元表面形状測定装置

(57)【要約】
【目的】 高速で測定物の表面部分のXYZ座標データを記録し、寸法測定や表面検査、リバーサCAD機能を実行する。
【構成】 測定物1の表面部分をフリンジパターンを伴って投影する投影器4と、表面部分からの反射光を受け取るカメラユニット2、3を備え、カメラユニット2の投影器4の投影に対して1.9°から90°の角度であり、カメラユニット3はカメラユニット2の投影と少なくとも3°離れている。またカメラユニット2は受け取った反射光をまず第一電気信号を送り、カメラユニット3は受け取った反射光をまず第二電気信号を送る。



【特許請求の範囲】

- 【請求項1】 少なくとも二つの電気信号から測定物の表面を決定するために使用される3次元表面形状測定装置において、
少なくとも測定物の表面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段と、
前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段を備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の投影に対して第一角度をなす視線を有し、その第二手段は前記第一照射手段の投影に対して第二角度をなす視線を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なり、
前記第一手段は受け取った反射光をまず第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光をまず第二電気信号を送ることを特徴とする3次元表面形状測定装置。
【請求項2】 前記第一照射手段はフリンジパターンを有し、この照射光が透過して前記測定物の前記表面部分上に前記フリンジパターンを形成することを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。
【請求項3】 前記第一照射手段は波長フリンジパターンを有し、この照射光が透過して前記測定物の前記表面部分上に前記フリンジパターンを形成し、前記波長フリンジパターンは透明な帯と不透明な帯を交互に有し、該不透明な帯は該透明な帯より幅が広いことを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。
【請求項4】 前記不透明な帯は前記透明な帯の約3倍の幅であることを特徴とする請求項3に記載の3次元表面形状測定装置。
【請求項5】 前記第一照射手段は可変フリンジ格子を形成する手段を有することを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。
【請求項6】 可変フリンジ格子を形成する前記手段が照射パターンを形成する伝達及び非伝達部分を有する液晶ディスプレイであることを特徴とする請求項5に記載の3次元表面形状測定装置。
【請求項7】 前記第一手段は精密ビデオカメラであり、その前記第一電気信号が前記表面部分上の複数のXYZ座標点に関する情報を少なくとも有し、
前記第二手段は粗目ビデオカメラであり、その前記第二電気信号が前記表面部分上のフリンジパターンの位置を前記第一手段からの前記情報に基づき個々に決定する情報を少なくとも有することを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。
【請求項8】 前記第一手段が前記表面部分に対しほぼ垂直に配置され、前記第一角度が1.9°から90°までの範囲であり、前記第二手段の視線は前記第一手段の視線から少なくとも3°離れているように配置されることを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置

(3)

二手段は狭い境界のフリンジパターンを写すために狭い視界を有することを特徴とする請求項1に記載の3次元感面形状測査装置。

【図4項17】前記少なくとも最も一照射手段は照射光線を送る手段と、その照射光線を視察する手段と、視察された照射光線が透過するフリンジ格子を形成する手段と、前記透過部分上の前記フリンジパターンへの描写手段と、前記透過部分上の前記フリンジパターンの焦点と倍率を増大する手段と、前記フリンジパターンの焦点と倍率を増大させる手段を備えることを特徴とする。図4項1に記載の3次元形状測定装置。

【請求項18】 照射光線を規準する前記手段がコンデンサレンズであることを特徴とする請求項17に記載の3次元面形状測定装置。

【請求項19】 被写界深度を増大させる前記手段が、
ンホール穴であることを特徴とする請求項17に記載の
3次元表面形状測定装置。

【請求項20】 照射光線を視準するための前記手段が円筒状のコンデンサレンズであり、被写界深度を増大さ

せる前記手段が格子を形成する前記手段と平行に配置され、透明のほぼ直線の複数の帯が交互に並んだものであることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項21】 フリンジパターンを形成する前記手段がロンチ格子であることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項22】 フリンジパターンを形成する前記手段が不透明な帯と透明な帯とを交互に有する変形ロンチ格子であり、前記不透明な帯が前記透明な帯よりも幅広いことを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状頭定装置。

【請求項23】 前記不透明な帯の幅が前記透明な帯の幅の3倍であることを特徴とする請求項22に記載の3次元曲面形状測定装置。

【請求項24】 フリンジパターンを形成する前記少なくとも一つの手段が、種々の照射パターンを形成する伝導部分と非伝導部分とを有する液晶ディスプレイであることを特徴とする請求項17に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項25】 前記3次元表面形状測定装置は前記少なくとも第一照明手段と反射光を受け取る前記二つの手段と前記測定物の位置に対して静止位置に支持する手段を有し、前記測定物は移動可能であることを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項26】 前記3次元表面形状測定装置は前記少なくとも第一照射手段及び反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段を前記測定物と相対的に移動させる手段を有し、前記測定物は静止していることを特徴とする請求項1に記載の3次元表面形状測定装置。

ンジパターンを伴って照射する第二照射手段と、前記被照体部分からの反射光を受け取る少なくとも二つの第一、第二手段とを備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段及び第二照射手段に対して一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視線に対して第一角度を有し提持を有し、その第二手段は前

記第一照射手段の視軸に対し第二角度をなす視軸を有し、前記第二角度は前記第一角度と異なり、前記第二照射手段の視軸は前記第一照射手段の前記視軸と異なり、

前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気

番号を送ることを特徴とする3次元表面形状測定装置。

【請求項32】 前記第一照射手段は垂直フリンジパターンを投影し、前記第二照射手段は水平フリンジパターンを投影し、前記垂直及び水平フリンジパターンは前記表面部分上に交互に投影されることを特徴とする請求項31に記載の3次元表面形状測定装置。

【請求項33】 反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段の境界における水平方向の約45°以内に配置された前記裏面部分の部分エッジに対し、前記第一照射手段を選択する手段と、

反射光を受け取る前記少なくとも二つの手段の境界における垂直方向の約45°以内に配置された前記表面部分の部分エッジに対し、前記第二照射手段を選択する手段を備えることを特徴とする請求項31に記載の3次元要素形状頭像検出装置。

【請求項34】 前記第一手段は精密ビデオカメラであり、その前記第一電気信号が前記被面部分上の複数のXYZ座標点に関する情報を少なくとも有し、

前記第二手段は粗目ビデオカメラであり、その前記第二電気信号が前記表面部分上のフリンジパターンの位置を前記第一手段からの前記情報に基づき個々に決定する情報と少なくとも有することを特徴とする請求項31に記載の装置。

【請求項 35】 前記第一手段が前記表面部分とはほぼ垂直に配置され、前記第一角度が 19° から 90° の範囲内であり、前記第二手段の視軸が前記第一手段の前記視軸と少なくとも 3° はなれているように配置されることを特徴とする請求項 31 に記載の 3 次元表面形状測定装置。

【請求項36】測定物の表面を少なくとも二つの電気信号から決定するための3次元表面形状測定装置において

測定物の少なくとも表面部分をフリンジパターンを伴って照射し、照射光線を送る手段と、その照射光線を検出する手段と、その検出された照射光線が透過するフリンジ格子を形成する手段と、前記表面部分上の前記フリンジパターンの被写界深度を増大する手段と、そのフリンジパターンの焦点を前記表面部分に合わせる手段を有する装置。

る少なくとも第一照射手段と、

各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配列を有し、第一手段は前記第一照射手段の前記視軸に対して第一角度をなす視軸を有し、第二手段は前記第一照射手段の前記視軸を有し、第二角度をなす視軸を有し、前記第二手段の前記視軸と第一角度とは異なる、前記表面部分から反射した照射光を受容する少なくとも二つの手段を備える。

前記第一手段は、受け取った反射光を、まず第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を、まず第二電気信号を送ることを特徴とする。3次元表面形状測定装置。

【請求項37】 照射光線を視する前記方法がコンデ
ンサレンズであることを特徴とする請求項36に記載の
3次元表面形状測定装置。

【請求項38】 被写界深度を増大する前記手段がピンホール穴であることを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状測定装置。

【図表第39】 照射光線を相準する前記手段が円筒状のコンデンサレンズであり、被写界深度を増大させる前記手段が格子を形成する前記手段と平行に配置されたスリットであり、前記フリンジ格子が不透明と透明のほぼ連続の複数の帯が交互に並んだものであることを特徴とする請求項36に記載の帯状変形面形成用光学装置。

【請求項40】 フリッジボタンを形成する前記手段がロンチ格子であることを特徴とする請求項36に記載の3次元導面形状決定装置。

【請求項41】 フリッジパターンを形成する前記手段が不透明と透明の帯が交互に並ぶ波状ロンチ格子であり、前記不透明な帯の幅が前記透明な帯の幅より広いことを特徴とする請求項36に記載の3次元表面形状決定装置。

【請求項42】 前記不透明な帯の幅が前記透明な帯の幅の約3倍であることを特徴とする請求項39に記載の3次元表面形状測定装置。

【講求項 4 3】 測定物の表面を少なくとも二つの電気信号から決定するための 3 次元表面形状測定装置において

光を供給する光源手段と、その光源手段から光を受取り、その光の焦点を光学的画像投影器上に再び含む円面状コンデンサレンズ構造と、その円面状コンデンサレンズ構造と出力側付近に位置するほぼ平行な鏡形フリンジバターンを形成する開口手段と、そのバタースクリーン手段と表面防眩膜との間に位置し、各フリンジバターの端

断方向ではなく長き方向に沿ってディフォーカスを形成するスリット穴手段を有する、測定物の少なくとも役面部分を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段と、

前記表面部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段を備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配置を有し、その第一手段は前記第一照射手段の照射に対して第一角度をな

す視線を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視線
にに対し第二角度をなす視線を有し、前記第二角度は前記
第一手段の第一角度とは異なり、
前記第一手段は受け取った反射光を最も第一電気信号を
送り、前記第二手段は受け取った反射光を最も第二電気
信号を送ることを特徴とする3次元表面形状測定装置。
【請求項44】 測定物の表面を決定する3次元表面形
状測定装置において、
測定物の少なくとも一面を少なくとも一つのフリッジバ
ターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段により
照射し、
各々が前記第一照射手段に對して一定の空間的配置を有
し、精密カメラは前記第一照射手段の前記視線に對して
第一角度をなす視線を有し、粗目カメラは前記第一照射

手段の前提視線に対し第二角度をなす視線を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なる、前記場面部分から照射した照射光を受取る少なくとも二つのカメラを供給し、

測定物の精密カメラと粗目カメラとの間隔を示す3次元部分座標を供給し、

前記精密カメラから得たピクセル座標及び位相値の第一組を出力し、

粗目カメラから得たピクセル座標及び位相値の第二組を出力し、

各第一組及び第二組はそれぞれのピクセル座標から第一原座標位相値及び第二原座標位相値を各々取り出し、第一原座標位相値及び第二原座標位相値、並びに第一組及び第二組のピクセル座標に基づき第一真数値及び第二真数値を算出し、

第一、真数値及び第二真数値に基づき精密カメラの位置相マップを形成し、部分座標系に基づき部分マップ上に位相マップを形成し、測定位相面部分を表す幾何的な3次元座標系を形成する。3次元表面形状測定装置。

【図項45】 幾何的な3次元座標系に基づき測定物の表面部分の形状を描写するリバーコンとユートエイデッドデザイン操作を行う工程を含む図項44に記載の3次元表面形状測定装置。

【発明の詳細な説明】
【0001】

40

【産業上の利用分野】本発明は、XYZ座標データ集積（座標位置）及びシステムに関する。データ集積速度や機械的慣性などの欠如、装置コストの問題により、従来技術では達成できなかったような種々の重要な表面検査機能及びパースコンピュタエディテッドデザイン（以下パースCADと略す）機能を有する3次元表面形状測定装置に関する。

【0002】

【従来の技術】従来のXYZ座標データ集積システムは、座標測定器（以下CMMと略す）を用いた一点接

この第二のフリンジパターンは第一フリンジパターンに続くものであり、カメラが測定部分に対し数分の一秒間ほどと停止するだけである。これら全ての応用例は、機械的配型装置と固定ポイント間あるいはカメラの視野（field of view）間に設置することにより高精度の加速及び減速を可能にしているが、この配型装置の加速及び減速は処理時間の遅れの原因となっている。

【0004】システムレベルでは、全体的な機能の速度を速める方法として、小型のデータ集積の場合にデータ

50 「書く」方法がある。しかしながらこの方法を用

とされていると、データ集積システムを複雑な表面の特性及びきざり形状が測定される表面検査、及び広範囲の表面が詳細に測定される配座されるリバースCAD操作に利用しにくくなる。

【0005】固定された投影パターンを使用する高速3次元（以下3Dと略す）表面マッピングセンサの最も大きな問題は、広範囲なZ軸域（便宜上この用語を用いて知られており、Z軸の動的測定範囲をほぼ1フリンジパターンスাইクルの間隔に限定する。前記の従来技術を含む多くの技術を用いてこの問題を解決しようとして試み及、同様の方法によっても、高度のXYZ座標面測定及びマッピングを行うと同時に高密度のフリンジパターンのおける上記のような利点も実現するという、本発明の効果を達成できたものばならない。）

る。このZ軸域は測定される表面上に対しては直交をなす)上において正確であるのみならず、X軸及びY軸(測定される表面とは接する近傍の軸)上においても高度な空間的解像度あるようなXYZ座標系面マップを形成することができるかという点にある。しかしてこれが従来技術、例えば陰影モアレ法(米田特許3,627,427; 4,577,940・4,525,858; 及び4,939,380)や、投影モアレ法(米田特許4,212,073; 3,943,275)や、投影フリンジモアレ法(米田特許4,874,958)や、投影フリンジモアレ法(米田特許4,070,683; 及び4,842,411)では、この点を効果的に解決できない。高度なXY軸空間解像度を達成できそうな移相干渉法の基本方法も適当ではない。なぜなら格子パターンの場合フリンジ期間(fringe period)の間隔度も移相しななければならないため処理時間がかかり、比較的長い測定部分を静止させなければならないからである。固相参照格子を備えるもの及び備えないものを合わせた光学パラメータを備えるもの及び備えないものを合わせて利用すれば、もしフリンジパターンが高密度でなければX

【0006】前記の従来技術により2π問題及びZ軸の断片的範囲の問題を解決する方法の概略は以下の通りである。まず、理論的に算出したフリンジパターンを投影することにより、2πの意味性を軽減する方法がある。しかしながらこの方法は、データを収集しセンサに対して測定部分を静止させるためにある程度の時間が必要であるという点において、移相モアレ法と同様の問題がある。固定されたパターン技術においては、フリンジをモード化したり、基本フリンジパターンにさらに低い周波数のフリンジパターンを加えたり、あるいは2πの意味性を取り除くために特殊な「識別」加工をパターンに施すという方法が一般的である。これらの技術はそれぞれ2度フリンジパターンの効果を喪失する。これらの技術によるフリンジパターンの効果を持続するためには、変形パターンより2軸の測定精度を維持するためには、変形パターンにより生じる潜在的雑音またはエラーを軽減するより広範囲の画像フィルタ処理が必要である。従って、測定可能なXY座標における平面パッチがその他の場合より大きくなる。その結果、コーナー半徑、エッジ輪郭、形状部分、さす、領域的部分などの細密な高さ3D決定が必要である場合、これらの技術はあまり有用ではない。

Y軸において高い表面マップ空間解像度でありZ軸にお
30 フリンジ方向(Y軸方向)の空間的解像度はCCDイメ
ジングカメラのピクセルサイズと同じである。フリンジパ
ターンと直交方向(X軸方向)の空間的解像度は、投影
されたパターン(複数の基本周波数よりなる複合フリン
ジパターンを含む)の最高基本周波数により設定された
ナイキスト限界(Nyquist limit)により
決定される。フリンジパターンの画素コントラストが光

【0008】また本発明は、配面装置の加速及び減速を不必要にし、高速な配面装置を簡単な機械的構造で形成することも目的としている。その結果、高い信頼性があり、簡単に安価な配面装置が得られる。さらに本発明は、既存のCADソフト及びメニューを利用して操作者が直接的に操作することによりデータを操作したりデータをCADデータファイルに変換したりする（いわゆるリバーズCAD機能）際に便利のように、データを作成することも目的としている。

リングジャターのカメラ視界も変化する。フリッジバターの基本周波数が完全に1サイクル変化すると、表面位置についての情報が失われる。これはモアレ法及び干涉計によるフリッジバターン処理において「2 π 四隅」測定物の表面を決定するために使用される3次元表面形状【課題】を解決するための手段及び作用】以上の目的を達成するために本発明は、少なくとも二つの電気信号から【0009】

す反轉を有し、その第二手間は前記第一、第二手間の二角度と異なり、前記第一手間は受け取った反射光を發す第一電氣回路を送り、前記第二手間は受け取った反射光を發す第二電氣回路を發することと特徴とする3次元表面形状測定装置。

【附求項 4.4】測定物の表面を決定する 3 次元表面形状測定装置において、

照射し、測定物の少なくとも表面を少なくとも一つのフリンジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段により

各々が前記第一照写手段に対して一定の空間的配置を有し、精密カメラは前記第一照写手段の前記視線に対して第一角度をなす視線を有し、粗目カメラは前記第一照写手段の前記視線に対して第二角度をなす視線を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なる、前記表面部分から反射した照明光を受取る少なくとも二つのカメラを供給し、

測定物の精密カメラと粗目カメラとの関係を示す3次元部分座標を供給し、

前記精密カメラから得たピクセル座標及び位相値の第一組を出力し、

前記粗目カメラから得たピクセル座標及び位相値の第二

各第一組及び第二組はそれぞれのピクセル座標から第一原座標位相値及び第二原座標位相値を各々取り出し、

第一原価開位相値及び第二原価開位相値、並びに第一組及び第二組のピクセル座標に基づき第一真整數値及び第二真整數値を算出し、

第一、真型数値及び第二真型数値に基づき精密カメラの位置相マップを形成し、部分座標系に基づき部分マップ上に位相マップを形成し、測定物表面部分を表す幾何的な3次元座標系を形成する3次元表面形状測定装置。

【請求項45】 最終的な3次元座標組に基づき測定物の表面部分の形状を描写するリバーコンピュータエイドドデザイン操作を行う工程を含む請求項44に記載の3次元表面形状測定装置。

【発明の詳細な説明】
【０００】

【産業上の利用分野】本発明は、XYZ座標データ集合積装匣及びシステムに関する。データ集合積度や機械的値

頼性の欠如、装値コストの問題により、従来技術では達成できなかったような種々の重要な表面検査機能及びリ

パースコンピュータエイデッドデザイン（以下リハースCADと略す）機能を有する3次元表面形状測定装置に
関する。

【0002】
【従来の技術】従来のXYZ座標データ集積システムは、座標測定器（以下CMMと略す）を用いた一点接

状測定装置において、少なくとも測定物の表面部分を少なくとも一つのプリングジパターンを伴って照射する少なくとも第一照射手段と、前記照射部分から反射した照射光を受取る少なくとも二つの手段とを備え、該少なくとも二つの手段の各々が前記第一照射手段に対して一定の空間的配座を有し、その第一手段は前記第一照射手段の視線に対して第一角度をなす視線を有し、その第二手段は前記第一照射手段の視線に対し第二角度をなす視線を有し、前記第二角度は前記第一角度とは異なり、前記第一手段は受け取った反射光を表す第一電気信号を送り、前記第二手段は受け取った反射光を表す第二電気信号を送ることを要旨とする。

【0010】前記構成を有する本発明は、第一手段及び第二手段である二台のカメラをそれぞれ異なった位置に設置して同時に写し、高密度プリングジパターンを記録させる。各カメラはそれぞれ異なった既知のジオメトリで第一照射手段である投影器（従って互いに）参照（reference）されているので、2軸測定範囲における2 π の曖昧性は解決できる。測定部分をセンサに対して静止する必要があるため、高速測定が可能であるだけでなく、高密度モアレプリングジパターンの全ての利点が得られる。

【0011】モアレ処理法の理論に基づく本発明はさらに、体積測定法または写真測量法に基づいた二台（またはそれ以上）のカメラによる表面マッピングシステムが有する、XY空間解像度の限界を克服することである。この体積測定法及び写真測量法は、3D表面上の「識別可能な」点を写し、カメラが互いを参照する方法や各カメラ内で画像化された共通の点のパララックス差を知らることにより、これらの識別可能な点のXY座標を測定するものである。滑らかな表面の場合適切な識別可能な点がない可能性があるため、投影器が表面上の点に光学的に「タグ」を付け、それをカメラが写す場合もある。この投影されたタグ付きの点は、体積測定法または写真測量法の処理に使用される「共通」の点を選択する際に混乱されないよう、通常十分間隔があげられている。その結果、このようにして得られたXYZ座標マップのXY座標空間解像度は、本発明に基づき高密度プリングジパターンのような解像度よりかなり低密度となる。またいずれのカメラに対する投影器の既知のジオメトリの位置も、体積測定処理の一部として利用できない。

【0012】ウッドの米国特許4,842,411は、二台のカメラと一台のプリングジパターンの投影器を備え、測定部分の3D表面を測定する体積測定センサを開示している。しかしながら、カメラに対する投影器ユニットのジオメトリの配置はプリングジパターンの体積測定処理には使用できない。従って、プリングジパターンの間隔は、プリング処理の際の混乱を回避する、即ち2 π 問題を回避するためかなり長い。よってウッドの体積測定センサが二

台のカメラを使用しているものの、二台またはそれ以上の各々のカメラに対する投影器のジオメトリ配置を利用した本発明の方が、高い表面マップXY解像度を得ることができる。

【0013】本発明のその他の利点としては、体積測定法よりも多くの表面データポイントが処理でき、それにより最適な回帰分析処理に基づくより正確な表面マップが得られる。本発明のある程度根幹をなすのは、センサヘッド及びデータ収集方法である。単一の投影器により測定部分にプリングジパターンの投影するが最も簡単な方法であるが、本発明ではプリング投影器及びセンサであるCCDカメラ内部に特殊な光学的技術を用い、画像コントラストを向上させてより高密度なプリングジパターンの得る。さらに、少なくとも二個以上の固体CCDカメラを用いて、投影器の視線（line of sight; LOS）と相対的にそれぞれ異なる方向からプリングジパターンを写す。便宜上、この第一のセンサを精密カメラと称し、三角測量法の基準に基づいて投影器の視線に対し通常15°から90°の間とする。第二のカメラは、その光学的視線が精密カメラの光学的視線または投影器の光学的視線のいずれとも完全に一致しないことと条件に、任意の別の方向からほぼ同じ表面画像を写す。通常3°以上異なっていなければならない。便宜上、第二のカメラを粗目カメラと称す。これら二つのカメラから得たデータにより、センサヘッドの測定容量内の明確なXYZ座標データパターンが得られる。この測定容量は通常カメラの視野（field of view; FOV）であり、カメラの光学的描写解像度のほぼ半分である。第三のカメラは、精密カメラの光学的描写解像度の全体を測定するように別の角度で設置されている。現者のビデオフレーム補正器（video frame grabber; VFG）により、画像のデジタル化及び集積が同時に可能である。さらに、現在測定システムに使用されているほとんどのCCDセンサは電気シャッタを備えられており、測定物を1ミリセカンデ以下で「同時に」写すことができる。この場合シャッタ時間が短いため光の強度が不十分なので、ストロボ照明器が投影器に用いられる。この方法で10マイクロセカンデの光パルスのストロボ光が得られる。白昼下の操作でも、堅固した細い帯状の光学的スペクトルフィルタをカメラの前に設置した投影器と共に、（光学ファイバケーブルを介して）レーザー装置を使用することができ、光学ファイバケーブル素子、レーザー光が測定部分から反射する時それ以上増倍せず目に危険でないよう、効果的にレーザー光を分散させる。

【0014】XYZ座標データ処理の画像を仮想上即時に集積する方法により、カメラを測定部分に対して静止または固定位置に配置するセンサ配置は不必要となる。従って、測定部分とセンサヘッドの両方あるいは何れか一方は、機械的加速及び減速機能に伴う時

間的制約を受けずに、高速データ適用範囲において連続的に再配置及び移動可能である。さらに、配置装置に必要な機械設備も、センサヘッドの測定容量及び視野が大きいため、かなり省ける。特に、標準的な線型及び回転型エンコーダまたはその他の3D記録装置を用いて機械的位置を記録する限り、データ集積中の正確な機械的位置は重要ではない。線型及び回転型エンコーダからの配座装置についての出力、または3D記録装置からの配座装置についての出力は、カメラのデータ集積と同時にコンピュータ処理システムに送られる。これにより、カメラのXYZ座標から、全体座標系あるいは部分座標系に正しく座標変換することができ、また機械的正確さ、繰り返し、解像度が腐敗でなくとも良いので、測定システムの機械部分が腐敗で安価となり、同時に高速化が可能である。

【0015】センサヘッドの境界が新しい測定位置へ移行すると、そのデータを標準コンピュータアレイプロセッサにより処理しXYZ座標データを得る。従って、機械的配座技術が根本的に制約を伴うのと対称的に、本発明はコンピュータ処理技術に依る速度でデータ作成及び測定が可能である。その結果、その他のセンサ及びXYZ座標測定システムに比べ、現在のコンピュータ技術によってかなり高速で処理及びデータ集積が可能となる。得るコンピュータが開発されるに従い、データ集積のスピードを機械的配座装置のスピードとは無関係により高速にすることができようであろう。

【0016】本発明により測定部分の大量なXYZ座標データが短時間で測定できるので、ぎざの検出あるいは広範囲な測定部分上の微細な部分の検出が可能である。データ密度は通常、CCD精密カメラの各ピクセル（検出要素）におけるXYZ座標データポイント数である。例えば、512X512型CCDカメラにより、各検出につき約250,000個のXYZ座標データポイントが得られる。1024X1024型CCDカメラも現在入手可能であり、各検出につき約1,000,000個のXYZ座標データポイントが得られる。512X512型カメラの測定精度は、光学的視野の1/2000から1/5000までである。1024X1024型CCDカメラの測定精度は、光学的視野の1/4000から1/10,000までである。さらに高密度の2D型CCDカメラが開発されており、それにより本発明の目的はより高精度で達成できる。プリングジパターンのカメラ境界及び投影器部分は、カメラ及び投影器の光学素子を変更することにより簡単に変更可能である。

【0017】センサヘッド光学素子は、プリングジパターンの最適な形となっている。プリング方向に沿ってスリットが設けられており、その狭い断面幅により投影されたスリットの間隔は、被写界深度を増大する。しかしながらスリットの長さにより測定容量中に1Dデフォーカスが維持されるので、投影器内のプリングパタ

ーンに存在し得る塵粒の影響は軽減される。これにより、円形穴が設けられた投影器よりもより低い性能及びコストの投影器のプリングジパターンのみを用いるだけで、投影器をより良い環境下で操作することも可能である。またこのスリット穴は、円形穴よりも大量の光学的パワーを伝達できる。

【0018】センサヘッドの第二（あるいは第三）のCCDカメラを省くために、線形複合プリング並びに線形及び疑似任意プリング加工をパターン内に含んで、特別なプリングパターンデザインを、この方法に利用することができ、これらの特別なプリングパターンは、徐々に変化する滑らかな表面の広範囲な測定部分に主に使用される。

【0019】本発明はまた、測定部分の形状に従い電気的にパターンを変化させるLCD型スクリーンを備えた、電気光学的プリングパターン発生器が使用可能である。これらのパターンは、カメラが測定部分に対して静止している場合単に線形プリングパターンに変化したり、あるいは測定部分の特性（即ち測定表面が滑らかであるか複雑な形状であるか）に従い新しいパターンに変化したることができる。

【0020】本発明はリバーSCADシステムへの新しいアプローチを提供する。個々の測定ポイントを長い時間や費やして集積するのではなく、かなり大量のXYZ座標データ（メッシュまたは「クラウド」と称す）がモアレ法センサ検査ごとにほぼ即時に集積される。本発明のリバーSCADシステムは、各検査により得られたデータのデータ「クラウド」を、SCADシステムに通常使用される3D表面表示体、例えばクーンズパッチ（Coons's Patch）、ベジエ表面（Bezier Surface）、ナーブズ（Nurbs）等に即時に変換する高速プロセッサを備える。そして得られた3D表面は再び早くCADモニター上に表示され、操作者がそれを「リアルタイム」あるいは「オンライン」で見ることができ、これらの3D表面モデルは位置情報プロセッサに情報を与えることもでき、これによりモアレ型センサの境界の軌道及び位置を自動的に計算し、制御できる。

【0021】このリアルタイムの表示により、操作者はオンライン操作でCADパラメータを再設定できるので、操作者の使用目的が達成可能となる。それぞれの表示ごとに、得られたXYZ座標3D表面モデルがほぼ実際の測定XYZ座標データに近い値を示す評価番号が操作者に与えられる。この評価番号により、操作者は測定部分に対してCADモデルをどれほど正確にしたいかが技術的決定を下す。本発明では高速で、また高精度でデータを集積するので、操作者はリアルタイムのデータ表示にインターフェースしてこのリバーSCAD機能を実施することができ、このシステムは大きく分けて、自動的にデータ出力する完全自動制御のリバーSCA

D機能を持つ場合と、予め操作者が見て確認する場合がある。

【0022】

【実施例】以下、図面を参照して本発明の実施例を説明する。本発明は種々のものに適用可能であるが、図1に示すような3次元形状測定装置に最も適している。

【0023】二台のカメラを用いた本発明の基本的なモアレ処理技術を図1に示す。3D測定物体1は、二台のカメラユニット2、3及び単一フリンジパターン投影器4に写される。これらの光学装置は、端面な設置面5上に設置されており、表面測定工程及びデータ集積工程の間光学装置の相対的な配置が維持されている。図1に示さない移動装置により、配置台5及び/または測定物体1を相対的に移動させる。通常オフラインで測定以前に行う校正や配置により、カメラユニット2、3と投影器4の相対的なジオメトリ的關係を各々決定する。図1に示された各カメラユニット2、3は、イメージレンズ6及び標準ビデオCCDなどの2D検出アレイ装置7を備える。各カメラユニット2、3は参照格子を必要とし、図1に示された投影器4は透過白色光源8を備え、この光源8は光学ファイバ束9を介して光を投影器4へ送る。光学ファイバ束9はガラスのスライドフリンジパターン10を照明し、スライドフリンジパターン10は測定物体1上の表面パッチ11上に再び映し出される。以下、投影器4の光学的構造についてさらに詳細に説明する。

【0024】フリンジパターン10を伴った表面パッチ11は、二台のカメラユニット2、3により写される。スライドフリンジパターン10は通常ガラス製で、透明な帯と不透明の帯からなる一連の線形フリンジに形成され、ロンチ格子(Ronchi grating)として知られている。通常の光学的形状の場合、カメラユニット2の視線(LOS)を検査表面に対してほぼ直角に配向する。カメラユニット2を精密カメラと呼ぶ。投影器

4の視線はカメラユニット2の視線より通常30°から90°離れている。カメラユニット3も基本的には同じパッチ表面を、投影器4の視線とカメラユニット2の視線とは真逆の角度で写す。粗目カメラとなるカメラユニット3は通常、その視線の角度が投影器4の視線あるいはカメラユニット2の視線から少なくとも3°以上離れて配置される。これらのカメラユニット2、3は、通常透過電気サポートユニット12に接続されている。この透過電気サポートユニット12及び白色光源8により、投影器4及びカメラユニット2、3よりなる小型センサが配置台5上で作動する。さらに、電気サポートユニット12及び光源8からの熱源がセンサから離れて設置されているので、測定がより正確になり、熱効果による有害な影響がより軽減される。白色光源8は、CCDユニットの雑音信号の条件に従い、逆転型でもストロボ型でもよい。CCDユニットの電気サポートユニット12

は通常電気シャッタを備え、これによりデータ集積の間測定部分に対しセンサが移動して画像がぼやけないうちになっている。画像はさらに、光源8にストロボ白色光照明器を設置することによりCCDアレイ装置7上に固定できる。また、光源8は細いスペクトル帯の可視レーザ光、例えばHeNeなど交換してもよく、これにより白昼下における測定も可能となる。この場合、カメラユニット2、3はCCDアレイ装置7の前に標準の細い透過帯域のスペクトルフィルタを備える。光学ファイバ束9はレーザの短寿命性(collimated properties)を効果的に除去し、レーザ光が投影器4から乱反射しても目に安全となっている。

【0025】図1に示されているように、カメラユニット2、3の各CCDアレイ装置7上にはほぼ同時に記憶された画像は独立のデジタル化装置13または共通のデジタル化装置に電気的に送られ、これらのデジタル化装置13はデジタル化されたデータをデジタル画像記憶装置14及び/または高速コンピュタプロセッサ15に送る。このコンピュタ構造により、高速プロセッサ15が画像集積速度で処理するとコンピュタ動力が不足である場合に、高速データ速度で二台のカメラの連続的なデジタル画像を記憶することが可能である。現在の技術により、プロセッサ15の処理速度が増え高速化している。このため、画像記憶装置14の容量は重要ではない。この高速コンピュタプロセッサ15の出力は、センサ座標上のx、y、z、データである。このデータはさらに全体座標プロセッサ16により部分(または全体)XYZ座標系に変換される。このプロセッサ16にはセンサ及び/または部分配置装置17からのデータが入力される。プロセッサ16からの出力はデータ記憶ユニット18及び/または応用プロセッサ19に送られる。この応用プロセッサ19はシステム応用に適し、3D形状を寸法的に有効にし、表面検出やその抽出、リバースCAD機能を実行する。

【0026】検査範囲である表面パッチ11上に投影された高解像度のフリンジパターンは、高精度で高解像度のXYZ座標マップを形成する。カメラユニット3はその同じパターンを写し、カメラユニット2がさらに同じパターンを写して個々にフリンジパターンの位置を決定することにより、標準的な単一カメラによるモアレ技術の限界を克服している。固定されたフリンジパターン技術の独特な点は、カメラユニット検出器の大きさや相対的に、XYZ座標表面マップの高空間解像度が線形フリンジ束の方向に沿って得られることである。フリンジパターンと交わる空間解像度が比較的小さいのは、関連する空間波数がナイキスト基準として示される基本投影フリンジパターン周波数の原則により制限されるからである。

【0027】以下、図1に示す複数のカメラを用いた装置により「2π問題」を解決する方法について述べる。

この方法のフローチャートを図9に示す。投影モアレシステムがカメラAとB、及び単一投影器からなるものとす。各カメラが共通の測定表面から得る位相マップ

$$\text{CAM A: } i_a, j_a, \phi_a \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{CAM B: } i_b, j_b, \phi_b$$

【0029】とする。i、j及びi、jはそれぞれカメラA、Bのカメラピクセル(イメージ素子、検出器位置など)値である。位相値φ及びφはラジアン表示10φ、及びφであり、それぞれφ及びφ、との関係は以下の等式の通りである。

で、投影位相パターンについて各カメラが写した移動量を表す。2π値はカメラが写した完全なフリンジ移動に相当するもので、単一フリンジ移動は多く起こっている

$$\phi_a = \delta \phi_a + 2\pi N_a + \eta_a \quad \dots \quad (2)$$

$$\phi_b = \delta \phi_b + 2\pi N_b + \eta_b$$

【0031】この式において、N_a及びN_bは整数である。これらの正しい値を選択すること、即ち「2π問題」は、実際のモアレ法センサシステムの設計において20である。各カメラはそのi、j、φの値をそれぞれ、部分あるいは全体座標系に基づきx、y、z値にマッピングする。カメラAについては、
及びσ_aは、通常2πのほんの一部である(例えばσ_a = 2π/100)。★
= σ_a ≡ 2π/100。★

$$\begin{aligned} X &= f_x(i_a, j_a, \phi_a) \\ Y &= f_y(i_a, j_a, \phi_a) \\ Z &= f_z(i_a, j_a, \phi_a) \end{aligned} \quad \dots \quad (3)$$

【0034】であり、カメラBについては、
★
= σ_b ≡ 2π/100。★

$$\begin{aligned} X &= g_x(i_b, j_b, \phi_b) \\ Y &= g_y(i_b, j_b, \phi_b) \\ Z &= g_z(i_b, j_b, \phi_b) \end{aligned} \quad \dots \quad (4)$$

【0036】となる。この計算において、与えられる表面はZ軸方向に対して垂直ベクトルを本来的に(詳しくはZ軸に対し±45°以内)ことが仮定される。また、★

$$f_z(i_a, j_a, \phi_a) = g_z(i_b, j_b, \phi_b) \quad \dots \quad (5)$$

【0038】の関係式が成り立つので、N_aとN_bとは相関することがわかる。これにおいて、δφ_a及びδφ_bの原位相の測定から個々のN_a(及びN_b)を決定する方法が得られる。(5)の式は次のような多項式に書き換え*

$$a_0 + a_1 \phi_a + a_2 \phi_b^2 = b_0 + b_1 \phi_b + b_2 \phi_b^2 \quad \dots \quad (6)$$

【0040】但しaの係数はi_a及びj_aの関数であり、50 bの係数はi_b及びj_bの関数である。ほとんどの実際の

センサ決定の非線形範囲は通常短い (但し $a_1 < a_2$, $b_1 < b_2$ 、また ϕ_1 が数百ラジアン) の最大値を

とる)。従って等式 (6) から得られる線形の関係は以 *

$$a_0 + a_1 \phi_0 = b_0 + b_1 \phi_0$$

または

$$(a_0 - b_0) + a_1 \phi_0 - b_1 \phi_0 = 0$$

...

(7)

【0042】 N_0 、及び N_1 を、等式 (2) の関係を用い 10 ※ 【0043】

て等式 (7) に対する解となり得るような真の整数 (通常

未知である) とすると、次のように書き換えられる。 ※

$$(a_0 - b_0) + a_1 \phi_0 - b_1 \phi_0 = 0$$

$$= (-a_1 N_0^* + b_1 N_0^*) \cdot 2\pi$$

$$-a_1 \eta_0 + b_1 \eta_0$$

...

(8)

【0044】 ノイズ範囲、即ち η_0 、及び η_1 は、 2π よりもかなり短い必要がある。正確な条件については後に記述する。ここで複数カメラにおける 2π 問題は、同様の

関係を満たす他の N_0 、及び N_1 が存在するかどうか判 *

$$2\pi (-a_1 N_0^* + b_1 N_0^*) - a_1 \eta_0 + b_1 \eta_0$$

$$= 2\pi (-a_1 N_0 + b_1 N_0)$$

...

(9)

【0046】 これは以下のように書き換えられる。

☆ 【数10】

$$\delta N_0 = \frac{b_1}{a_1} \delta N_0 + \eta_0 \quad \dots \quad (10)$$

【0048】 但し

◆ 【数11】

$$\delta N_0 = N_0 - N_0^*$$

$$\delta N_0 = N_0 - N_0^*$$

$$\eta_0 = (-\eta_0 + \frac{b_1}{a_1} \eta_0) \frac{1}{2\pi}$$

...

(11)

【0050】 この場合ノイズ η_0 は、以下の標準偏差を

有する。 *

【数12】

$$\sigma_0 = [1 + \frac{b_1}{a_1}]^{1/2} (\sigma/2\pi)$$

...

(12)

【0052】 但し $\sigma_0 = \sigma$ 、 σ の条件が各々のカメラノ

イズ源に対し仮定される。精密カメラ、即ちカメラ A に

対して適切な可変範囲の拡張が可能かどうかの判断、つ ※

【数13】

$$-N_{max} \leq N_0 \leq N_{max} \quad \dots \quad (13)$$

【0054】 どのような N_0 値の範囲で明白に機能するこ

とが可能かどうかの判断は、 b_1/a_1 の比率が値とな

る。但し通常は $N_{max} = 5$ である。しかしながらこの b_1

$/a_1$ の比率は、カメラ A 及びカメラ B が投影器に対し *

【数14】

$$a_1 = \frac{P_0}{2\pi \tan \alpha_p - \tan \alpha_a} \quad \dots \quad (14)$$

【0056】

☆ ☆ 【数15】

1

$$b_1 = \frac{P_0}{2\pi \tan \alpha_p - \tan \alpha_a}$$

...

(15)

【0057】 または

◆ 【数16】

◆³⁰

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{1 - \tan \alpha_p}{1 - \tan \alpha_a} \quad \dots \quad (16)$$

【0059】 但し、 α_p は Z 軸に対する投影器の角度

α_a は Z 軸に対するカメラ A の角度

α_p は Z 軸に対するカメラ B の角度

P_0 は測定部分空間におけるフリンジパターン間隔であ

る。

【0060】 一般的なセンサとしては、 $\alpha_p = 30^\circ$ 及

び $\alpha_a = 0^\circ$ (精密カメラは Z 軸に沿って整列されてい

る) であり、粗目カメラ即ちカメラ B の角度 α_a は 0° *

【数17】

$$\delta N_0 = \frac{b_1}{a_1} \delta N_0 \quad \dots \quad (17)$$

【0062】 が、 N_0 の関連範囲において $\delta N_0 = \delta N_0$ 、

$= 0$ 以外の δN_0 、及び δN_0 の解の整数を有するか否かに

よる。いま、比率を

$$\frac{b_1}{a_1} = \frac{NUM}{DEN} \quad \dots \quad (18)$$

【0064】とする。但しDENは b_1/a_1 の最少公分母とする。すると0でない最近似の整数の解は、
* $|\delta N_b| = NUM$ * [数19]
* [0065]

$$\dots \quad (19)$$

$$|\delta N_b| = DEN$$

【0066】となる。もし $NUM \geq 2N_{max} + 1$ ならば、ノイズなしの条件のための望ましい精密カメラの範囲 ($-N_{max} \leq N \leq N_{max}$) において唯一の解が存在する。位相決定ノイズ (標準偏差 σ) が存在する実際の測*

【0067】
【数20】

$$\frac{1}{DEN} \left\langle \frac{b_1}{a_1} \right\rangle \sigma = \left[1 + \left(\frac{b_1}{a_1} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{\sigma}{2\pi} \quad \dots \quad (20)$$

【0068】ここで、 $1/DEN$ は等式(10)の間、即ち (b_1/a_1) δN_b の最少の値を指す。この値はこの等式のノイズ範囲よりも大きくなければならない。関係式20は実際にはそれと恒等的ではない。な*

$$\frac{1}{DEN} \left\langle \frac{NUM}{DEN} \right\rangle \frac{2\pi}{DEN}$$

【0070】または、
【0071】
【数22】
$$NUM \left\langle \frac{2\pi}{\sigma} \right\rangle$$

【0073】この方法はさらに、等式(6)が非線形の場合、及び比率 b_1/a_1 がカメラピクセル位置 i, j, i_1, j_1 においてより大きく変化する場合、同様

【0074】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0075】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0076】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0077】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0078】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0079】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0080】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0081】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0082】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0083】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0084】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0085】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0086】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0087】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0088】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0089】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0090】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0091】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0092】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0093】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0094】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0095】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0096】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0097】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0098】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0099】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない
【0100】 $1/DEN$ 範囲よりもかなり小さくなくてはならない

【0072】であるからである。従って、もし位相決定ノイズが $\sigma = 2\pi/100$ であるならば、 $-5 \leq N \leq 5$ の範囲において条件を満たす唯一のセンサの解は $NUM = 1$ である。以下のような様々なカメラBの角度位置が可能である。

DEN=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
(または $\alpha_2 = 2.7^\circ, 2.5^\circ, 2.2^\circ, 2.0^\circ, 1.7^\circ, 1.5^\circ, 1.2^\circ, 0.9^\circ, 0.6^\circ, 0.3^\circ$)

【0074】図2(a)は図1の基本形測定システムの簡単な変形例を示す。図2(a)のシステムにおいて、測定部分の特徴やエッジに対し種々の配列で高空間解

度が増される。精密カメラ21、粗目カメラ22及び投影器24は図1の実施例と同様の機能を果たし、垂直方向に配列されたフリンジパターン26を得る。パターン26の輪形フリンジは精密カメラ21の粗目と投影器24の粗目を含有するジョイントリー約面とほぼ垂直である。また、粗目カメラ22はこの面内になくてもよい。

従って、水平方向のフリンジパターン30を投影する投影器28を配置することが可能である。任意の一点で投影器24と28のいずれか一方が作動する。しかしながら、カメラ21及び22の面方向が同時に、垂直方向に投影されたフリンジ26と水平方向に投影されたフリンジ30のうちのいずれかを写す。投影器光源32及び34に電気ストロボや機械的シャッターを設け、投影器24と28間の変換を迅速に行うようにしてもよい。水平方向のほぼ 45° 以内に配列された測定部分のエッジに

【0069】
【数21】
【数22】
【数23】
【数24】
【数25】
【数26】
【数27】
【数28】
【数29】
【数30】
【数31】
【数32】
【数33】
【数34】
【数35】
【数36】
【数37】
【数38】
【数39】
【数40】
【数41】
【数42】
【数43】
【数44】
【数45】
【数46】
【数47】
【数48】
【数49】
【数50】
【数51】
【数52】
【数53】
【数54】
【数55】
【数56】
【数57】
【数58】
【数59】
【数60】
【数61】
【数62】
【数63】
【数64】
【数65】
【数66】
【数67】
【数68】
【数69】
【数70】
【数71】
【数72】
【数73】
【数74】
【数75】
【数76】
【数77】
【数78】
【数79】
【数80】
【数81】
【数82】
【数83】
【数84】
【数85】
【数86】
【数87】
【数88】
【数89】
【数90】
【数91】
【数92】
【数93】
【数94】
【数95】
【数96】
【数97】
【数98】
【数99】
【数100】
【数101】
【数102】
【数103】
【数104】
【数105】
【数106】
【数107】
【数108】
【数109】
【数110】
【数111】
【数112】
【数113】
【数114】
【数115】
【数116】
【数117】
【数118】
【数119】
【数120】
【数121】
【数122】
【数123】
【数124】
【数125】
【数126】
【数127】
【数128】
【数129】
【数130】
【数131】
【数132】
【数133】
【数134】
【数135】
【数136】
【数137】
【数138】
【数139】
【数140】
【数141】
【数142】
【数143】
【数144】
【数145】
【数146】
【数147】
【数148】
【数149】
【数150】
【数151】
【数152】
【数153】
【数154】
【数155】
【数156】
【数157】
【数158】
【数159】
【数160】
【数161】
【数162】
【数163】
【数164】
【数165】
【数166】
【数167】
【数168】
【数169】
【数170】
【数171】
【数172】
【数173】
【数174】
【数175】
【数176】
【数177】
【数178】
【数179】
【数180】
【数181】
【数182】
【数183】
【数184】
【数185】
【数186】
【数187】
【数188】
【数189】
【数190】
【数191】
【数192】
【数193】
【数194】
【数195】
【数196】
【数197】
【数198】
【数199】
【数200】
【数201】
【数202】
【数203】
【数204】
【数205】
【数206】
【数207】
【数208】
【数209】
【数210】
【数211】
【数212】
【数213】
【数214】
【数215】
【数216】
【数217】
【数218】
【数219】
【数220】
【数221】
【数222】
【数223】
【数224】
【数225】
【数226】
【数227】
【数228】
【数229】
【数230】
【数231】
【数232】
【数233】
【数234】
【数235】
【数236】
【数237】
【数238】
【数239】
【数240】
【数241】
【数242】
【数243】
【数244】
【数245】
【数246】
【数247】
【数248】
【数249】
【数250】
【数251】
【数252】
【数253】
【数254】
【数255】
【数256】
【数257】
【数258】
【数259】
【数260】
【数261】
【数262】
【数263】
【数264】
【数265】
【数266】
【数267】
【数268】
【数269】
【数270】
【数271】
【数272】
【数273】
【数274】
【数275】
【数276】
【数277】
【数278】
【数279】
【数280】
【数281】
【数282】
【数283】
【数284】
【数285】
【数286】
【数287】
【数288】
【数289】
【数290】
【数291】
【数292】
【数293】
【数294】
【数295】
【数296】
【数297】
【数298】
【数299】
【数300】
【数301】
【数302】
【数303】
【数304】
【数305】
【数306】
【数307】
【数308】
【数309】
【数310】
【数311】
【数312】
【数313】
【数314】
【数315】
【数316】
【数317】
【数318】
【数319】
【数320】
【数321】
【数322】
【数323】
【数324】
【数325】
【数326】
【数327】
【数328】
【数329】
【数330】
【数331】
【数332】
【数333】
【数334】
【数335】
【数336】
【数337】
【数338】
【数339】
【数340】
【数341】
【数342】
【数343】
【数344】
【数345】
【数346】
【数347】
【数348】
【数349】
【数350】
【数351】
【数352】
【数353】
【数354】
【数355】
【数356】
【数357】
【数358】
【数359】
【数360】
【数361】
【数362】
【数363】
【数364】
【数365】
【数366】
【数367】
【数368】
【数369】
【数370】
【数371】
【数372】
【数373】
【数374】
【数375】
【数376】
【数377】
【数378】
【数379】
【数380】
【数381】
【数382】
【数383】
【数384】
【数385】
【数386】
【数387】
【数388】
【数389】
【数390】
【数391】
【数392】
【数393】
【数394】
【数395】
【数396】
【数397】
【数398】
【数399】
【数400】
【数401】
【数402】
【数403】
【数404】
【数405】
【数406】
【数407】
【数408】
【数409】
【数410】
【数411】
【数412】
【数413】
【数414】
【数415】
【数416】
【数417】
【数418】
【数419】
【数420】
【数421】
【数422】
【数423】
【数424】
【数425】
【数426】
【数427】
【数428】
【数429】
【数430】
【数431】
【数432】
【数433】
【数434】
【数435】
【数436】
【数437】
【数438】
【数439】
【数440】
【数441】
【数442】
【数443】
【数444】
【数445】
【数446】
【数447】
【数448】
【数449】
【数450】
【数451】
【数452】
【数453】
【数454】
【数455】
【数456】
【数457】
【数458】
【数459】
【数460】
【数461】
【数462】
【数463】
【数464】
【数465】
【数466】
【数467】
【数468】
【数469】
【数470】
【数471】
【数472】
【数473】
【数474】
【数475】
【数476】
【数477】
【数478】
【数479】
【数480】
【数481】
【数482】
【数483】
【数484】
【数485】
【数486】
【数487】
【数488】
【数489】
【数490】
【数491】
【数492】
【数493】
【数494】
【数495】
【数496】
【数497】
【数498】
【数499】
【数500】
【数501】
【数502】
【数503】
【数504】
【数505】
【数506】
【数507】
【数508】
【数509】
【数510】
【数511】
【数512】
【数513】
【数514】
【数515】
【数516】
【数517】
【数518】
【数519】
【数520】
【数521】
【数522】
【数523】
【数524】
【数525】
【数526】
【数527】
【数528】
【数529】
【数530】
【数531】
【数532】
【数533】
【数534】
【数535】
【数536】
【数537】
【数538】
【数539】
【数540】
【数541】
【数542】
【数543】
【数544】
【数545】
【数546】
【数547】
【数548】
【数549】
【数550】
【数551】
【数552】
【数553】
【数554】
【数555】
【数556】
【数557】
【数558】
【数559】
【数560】
【数561】
【数562】
【数563】
【数564】
【数565】
【数566】
【数567】
【数568】
【数569】
【数570】
【数571】
【数572】
【数573】
【数574】
【数575】
【数576】
【数577】
【数578】
【数579】
【数580】
【数581】
【数582】
【数583】
【数584】
【数585】
【数586】
【数587】
【数588】
【数589】
【数590】
【数591】
【数592】
【数593】
【数594】
【数595】
【数596】
【数597】
【数598】
【数599】
【数600】
【数601】
【数602】
【数603】
【数604】
【数605】
【数606】
【数607】
【数608】
【数609】
【数610】
【数611】
【数612】
【数613】
【数614】
【数615】
【数616】
【数617】
【数618】
【数619】
【数620】
【数621】
【数622】
【数623】
【数624】
【数625】
【数626】
【数627】
【数628】
【数629】
【数630】
【数631】
【数632】
【数633】
【数634】
【数635】
【数636】
【数637】
【数638】
【数639】
【数640】
【数641】
【数642】
【数643】
【数644】
【数645】
【数646】
【数647】
【数648】
【数649】
【数650】
【数651】
【数652】
【数653】
【数654】
【数655】
【数656】
【数657】
【数658】
【数659】
【数660】
【数661】
【数662】
【数663】
【数664】
【数665】
【数666】
【数667】
【数668】
【数669】
【数670】
【数671】
【数672】
【数673】
【数674】
【数675】
【数676】
【数677】
【数678】
【数679】
【数680】
【数681】
【数682】
【数683】
【数684】
【数685】
【数686】
【数687】
【数688】
【数689】
【数690】
【数691】
【数692】
【数693】
【数694】
【数695】
【数696】
【数697】
【数698】
【数699】
【数700】
【数701】
【数702】
【数703】
【数704】
【数705】
【数706】
【数707】
【数708】
【数709】
【数710】
【数711】
【数712】
【数713】
【数714】
【数715】
【数716】
【数717】
【数718】
【数719】
【数720】
【数721】
【数722】
【数723】
【数724】
【数725】
【数726】
【数727】
【数728】
【数729】
【数730】
【数731】
【数732】
【数733】
【数734】
【数735】
【数736】
【数737】
【数738】
【数739】
【数740】
【数741】
【数742】
【数743】
【数744】
【数745】
【数746】
【数747】
【数748】
【数749】
【数750】
【数751】
【数752】
【数753】
【数754】
【数755】
【数756】
【数757】
【数758】
【数759】
【数760】
【数761】
【数762】
【数763】
【数764】
【数765】
【数766】
【数767】
【数768】
【数769】
【数770】
【数771】
【数772】
【数773】
【数774】
【数775】
【数776】
【数777】
【数778】
【数779】
【数780】
【数781】
【数782】
【数783】
【数784】
【数785】
【数786】
【数787】
【数788】
【数789】
【数790】
【数791】
【数792】
【数793】
【数794】
【数795】
【数796】
【数797】
【数798】
【数799】
【数800】
【数801】
【数802】
【数803】
【数804】
【数805】
【数806】
【数807】
【数808】
【数809】
【数810】
【数811】
【数812】
【数813】
【数814】
【数815】
【数816】
【数817】
【数818】
【数819】
【数820】
【数821】
【数822】
【数823】
【数824】
【数825】
【数826】
【数827】
【数828】
【数829】
【数830】
【数831】
【数832】
【数833】
【数834】
【数835】
【数836】
【数837】
【数838】
【数839】
【数840】
【数841】
【数842】
【数843】
【数844】
【数845】
【数846】
【数847】
【数848】
【数849】
【数850】
【数851】
【数852】
【数853】
【数854】
【数855】
【数856】
【数857】
【数858】
【数859】
【数860】
【数861】
【数862】
【数863】
【数864】
【数865】
【数866】
【数867】
【数868】
【数869】
【数870】
【数871】
【数872】
【数873】
【数874】
【数875】
【数876】
【数877】
【数878】
【数879】
【数880】
【数881】
【数882】
【数883】
【数884】
【数885】
【数886】
【数887】
【数888】
【数889】
【数890】
【数891】
【数892】
【数893】
【数894】
【数895】
【数896】
【数897】
【数898】
【数899】
【数900】
【数901】
【数902】
【数903】
【数904】
【数905】
【数906】
【数907】
【数908】
【数909】
【数910】
【数911】
【数912】
【数913】
【数914】
【数915】
【数916】
【数917】
【数918】
【数919】
【数920】
【数921】
【数922】
【数923】
【数924】
【数925】
【数926】
【数927】
【数928】
【数929】
【数930】
【数931】
【数932】
【数933】
【数934】
【数935】
【数936】
【数937】
【数938】
【数939】
【数940】
【数941】
【数942】
【数943】
【数944】
【数945】
【数946】
【数947】
【数948】
【数949】
【数950】
【数951】
【数952】
【数953】
【数954】
【数955】
【数956】
【数957】
【数958】
【数959】
【数960】
【数961】
【数962】
【数963】
【数964】
【数965】
【数966】
【数967】
【数968】
【数969】
【数970】
【数971】
【数972】
【数973】
【数974】
【数975】
【数976】
【数977】
【数978】
【数979】
【数980】
【数981】
【数982】
【数983】
【数984】
【数985】
【数986】
【数987】
【数988】
【数989】
【数990】
【数991】
【数992】
【数993】
【数994】
【数995】
【数996】
【数997】
【数998】
【数999】
【数1000】
【数1001】
【数1002】
【数1003】
【数1004】
【数1005】
【数1006】
【数1007】
【数1008】
【数1009】
【数1010】
【数1011】
【数1012】
【数1013】
【数1014】
【数1015】
【数1016】
【数1017】
【数1018】
【数1019】
【数1020】
【数1021】
【数1022】
【数1023】
【数1024】
【数1025】
【数1026】
【数1027】
【数1028】
【数1029】
【数1030】
【数1031】
【数1032】
【数1033】
【数1034】
【数1035】
【数1036】
【数1037】
【数1038】
【数1039】
【数1040】
【数1041】
【数1042】
【数1043】
【数1044】
【数1045】
【数1046】
【数1047】
【数1048】
【数1049】
【数1050】
【数1051】
【数1052】
【数1053】
【数1054】
【数1055】
【数1056】
【数1057】
【数1058】
【数1059】
【数1060】
【数1061】
【数1062】
【数1063】
【数1064】
【数1065】
【数1066】
【数1067】
【数1068】
【数1069】
【数1070】
【数1071】
【数1072】
【数1073】
【数1074】
【数1075】
【数1076】
【数1077】
【数1078】
【数1079】
【数1080】
【数1081】
【数1082】
【数1083】
【数1084】
【数1085】
【数1086】
【数1087】
【数1088】
【数1089】
【数1090】
【数1091】
【数1092】
【数1093】
【数1094】
【数1095】
【数1096】
【数1097】
【数1098】
【数1099】
【数1100】
【数1101】
【数1102】
【数1103】
【数1104】
【数1105】
【数1106】
【数1107】
【数1108】
【数1109】
【数1110】
【数1111】<

ましい。標準的な高密度のフリンジパターンは図4(b)に示すロンチ格子74であり、線形で交錯しており、等間隔で並んだ透明な帯と不透明な帯よりなる。画像投影器装置72内に通常掛けられたピンホール穴75は微かな機能を果たす。例えば、穴が小さいことにより、投影器が面に垂直でない場合でも測定部分上面上の焦点を維持するので、投影されたパターンにおいてより大きな被写界深度が得られる。さらにピンホール穴75により、パターン中のあらゆる面やその他の小さな鏡片を効果的に除去することができ、この場合大量の光が無駄になることである。この種の穴が利用されるので、光源より大きな光学的照射力を保証するためより高出力の光源やより大きなコンデンサレンズ部材70を設置する必要がある。しかし、こうしてコンデンサレンズ部材70を大きくすると、全体の投影器が大きくなざるを得ない。

[0078] その他の例として、図4(c)に示すようにフリンジパターンの方向にスリット幅のコンデンサレンズ部材70を円筒状に形成した円筒状コンデンサレンズ77を設置してもよい。こうした形状であればより多い光量をシステム中に送ることが可能である。その結果、コンデンサレンズ及び投影器がより小型になる。スリット穴76のスリット長さにより、各フリンジパターンの横断方向ではなく長さ方向に沿って効果的にディフォーカスを形成する。従って、スリット幅はピンホール穴75の径と同じなので、良い被写界深度が維持される。フリンジ方向のディフォーカスにより被写界深度内のフリンジの質は劣化しない。1次元ディフォーカスにより、フリンジパターン71の各フリンジに現れるあらゆる偏りやこりが効果的に取り払われるので、投影されたパターン73の質はかえって向上する。光学的画像投影器装置72が非常に小さい投影パターン73を投影するように選好された場合、投影された線のロンチ格子74の基本的周波数は、ピンホール径あるいは単一スリット穴の狭い幅により決められた光学的回折限界に近い可能性が有る。投影線形フリンジパターン73を形成するためロンチ格子74を形成すると、コントラストを向上させる。この場合、交差した透明な帯と不透明な帯からなる線形のロンチ格子に類似するように変形する。しかしながら、等間隔で並べる代わりに、図4(e)に示すように約75%が不透明な帯で約25%が透明な帯となるようにフリンジを並べる。線形のロンチ格子に比べこの形状では光の無駄が大きい。光が送られる際のコントラストが向上し、またスリット穴76及び円筒状コンデンサレンズ77を使用することによりこれを補うことができる。

[0079] 図5(a)は図4(a)の投影器の変形を示し、固定されたフリンジパターンが投影されたガラススライド71(標準的ロンチタイプでも変形ロンチタイプでもよい)を液晶ディスプレイ(LCD)あるいはそれと同等な電気制御の伝達(または反射)装置81に取り替えたものである。このLCD装置81は光学的性質を備えておらず、また標準的な固定されたフリンジパターンのように直線ではないが、移相モアレ技術及び複数的フリンジパターン投影技術の両方を実施するため、電気的にパターンを変化させることが可能である。水平及び垂直両方の固定されたパターンモアレ技術が可能になるため、これらのLCDパターンを固定させることも可能である。例えば、図2(a)の水平及び垂直フリンジ投影器24、28は、反射型を含む単一の電気制御されたLCD投影器82あるいはその同等物、及び二台のカメラユニット83、84と取り替えることができる。垂直フリンジパターンに対しては、カメラユニット83が精密カメラとなりカメラユニット84が粗目カメラとなる。水平フリンジパターンに対しては、カメラユニット84が精密カメラとなりカメラユニット83が粗目カメラとなる。投影器82の光学的視線及びカメラユニット83の光学的視線を含むジオメトリ的平面は、投影器82の視線及びカメラユニット84の視線を含む面とほぼ垂直をなす面から約3°引いた位置になければならない。カメラユニット83の視線と投影器82の視線の間の角度は通常30°から60°であり、同様にカメラユニット84の視線と投影器82の視線の間の角度も30°から60°である。LCD81の変形(анomalies)を補うため、図4(a)に示された単一スリット穴76を形成する。これにより、全ての変形を各フリンジの方向に沿って効果的にばかし、光学的画像投影器装置72により測定部分表面上に理想的な投影フリンジパターン73を再び画像化することが可能となる。

[0080] 本発明の複合カメラによるセンサ技術により、図6、7、8に示す多くの検査システムの機械的構造が可能である。図6は、測定対象物100がセンサ102に対し完全に静止している状態を示す。センサ102は適した角度で移動し表面測定を完了する。本発明の小型センサ装置により、センサ102は高速で移動でき、測定表面に対し配置装置を停止させずに高速でXYZ座標表面パッチデータを附与することができるので、表面マッピング及びデータ集積の速度を大幅に向上させることが可能である。この結果、XYZ座標データを分析できるCADエンジニアやその他の操作者が、測定がなされている間オンラインで操作することが可能である。従って、測定時に操作者がオンラインで操作に変更や変形を施すことができる。図7は、機械的配置装置がセンサユニット104と測定部分106の間で分割されている測定システムの變形例を示す。図8は、静止しているセンサ112に対し測定部分110のみが移動する測定の變形例を示す。本発明の各變形例は、本発明の全ての作動上の基本的性質を備える。

[0081] 本発明は以上に示された例に限定されるも

のではなく、本発明の趣旨を逸脱しない限りにおいて種々の変形及び応用が可能である。

[0082]

【発明の効果】以上説明したように本発明の3次元表面形状測定装置は、測定中センサを測定部分に対して停止させることなく、XYZ座標データをカメラの視野内に同時に集積することが可能である。また本発明は、装置の加速及び減速が不要であるため、高い信頼性があり、簡単に装置を配置装置にすることができる。さらに本発明は、CADソフト及びメニューを利用して操作者が直接的に操作するリバーSCAD機能に便利なデータを作成することが可能である。

【図面の簡単な説明】

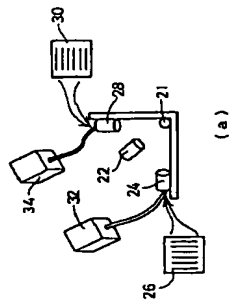
【図1】本発明の3次元表面形状測定装置を示す概略図である。

【図2】本実施例の二台の投影器の配置及び種々のカメラ視野面等を示す概略図である。

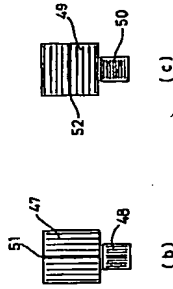
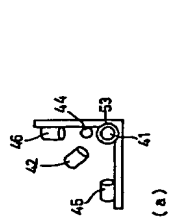
【図3】本実施例の三台のカメラと二台の投影器の配置

【符号の説明】
1 ... 測定物
2、3 ... カメラユニット
4 ... 投影器
10 ... スライドフリンジパターン
11 ... 表面パッチ

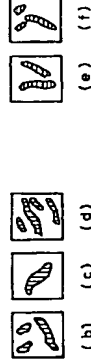
【図2】



【図3】



(a)



(b)

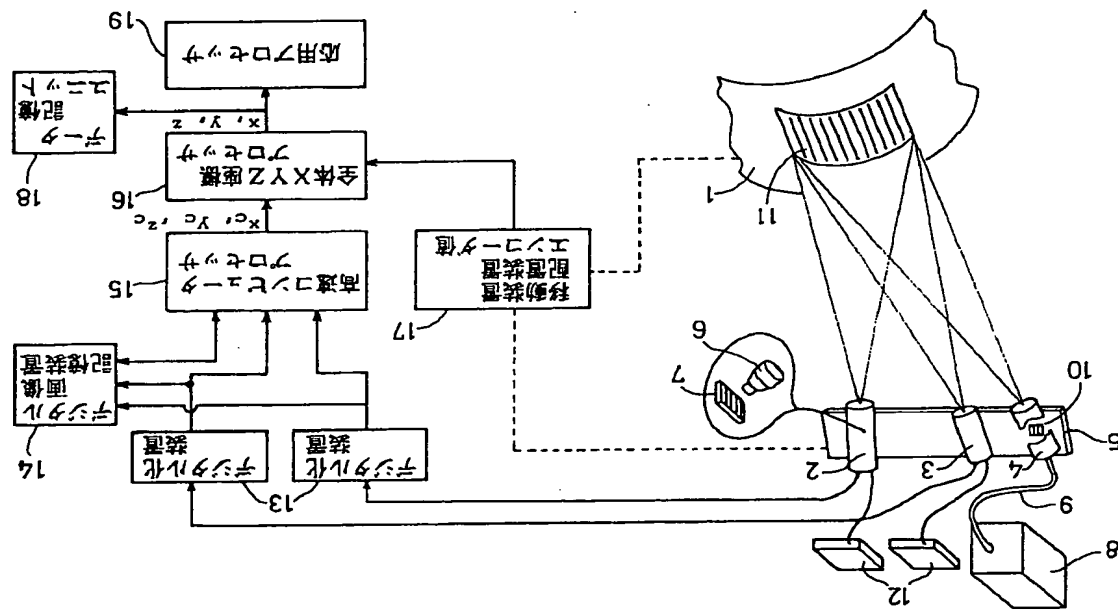
(c)

(d)

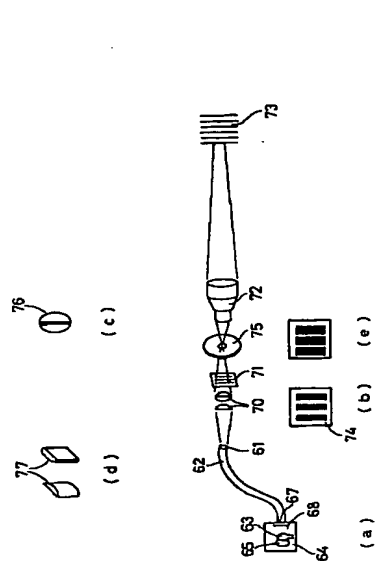
(e)

(f)

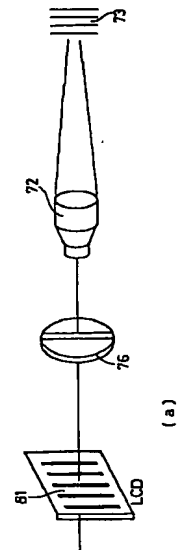
【図1】



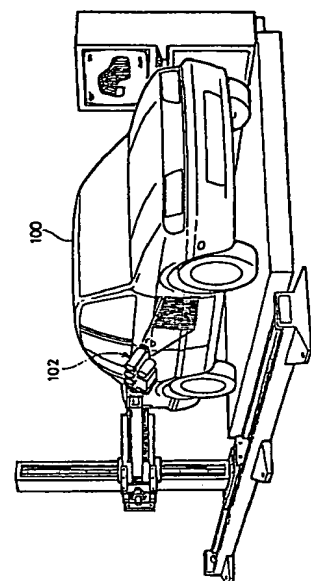
【図4】



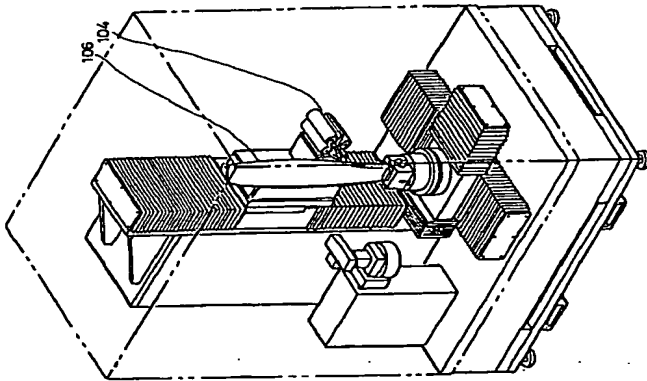
【図5】



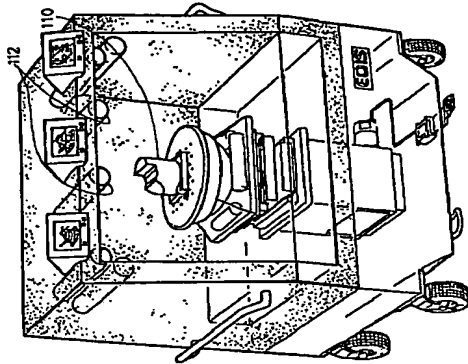
【図6】



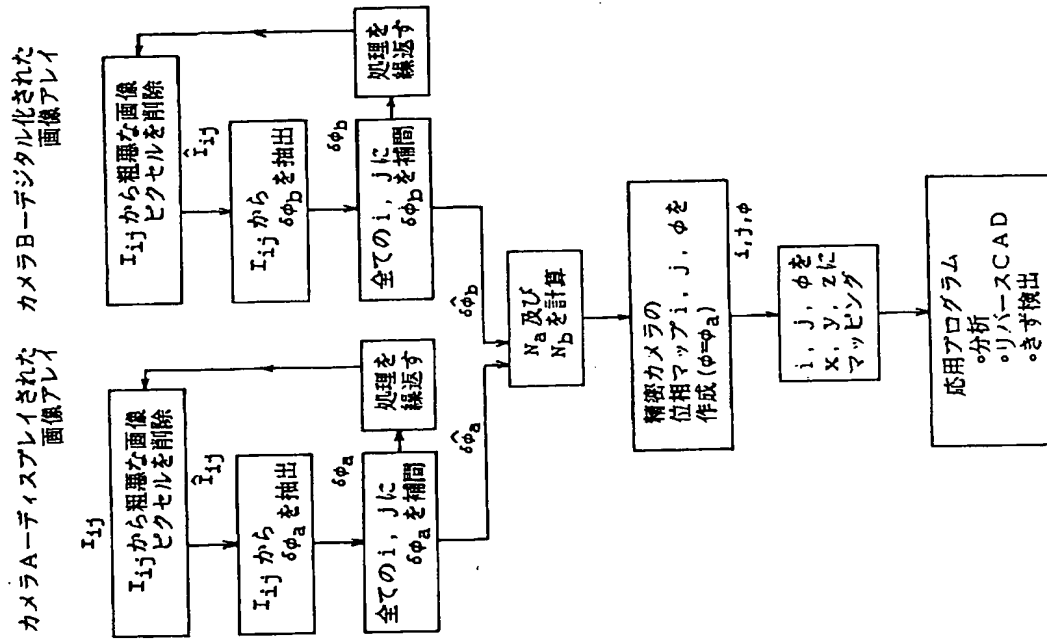
【図7】



【図8】



【図9】



SERIES 1

[Three-Dimensional Engineering]

Optical Three-Dimensional Measurement

Edited by Tohru Yoshizawa

New Technique Communications

5.1.3 Projection of Color Pattern

In the conventional systems, monotonous patterns are projected as if marking in white and black is done in a space. This pattern projection, of course, may be done in colors¹⁴⁾. Particularly as shown in Fig. 5.1.8, it is possible to form a continuous color distribution in a space by utilizing diffraction phenomena of diffraction grating using white light. In this case, the directions of light rays, diffracted, are univocally determined depending on their wavelengths (colors), respectively, and therefore, the color distribution is done as if ordering was done for each of the projected fringes. Accordingly, it becomes possible to determine the spatial coordinates in accordance with the principle of the trigonometrical survey. However, theoretically, it is necessary to identify the color (wavelength). For this reason, it seems necessary to obtain the stability and selectivity of wavelengths and to cut the peripheral light rays.

Reference Literature

[Collectively listed in the end of the next chapter (page 99)]

Fig. 5.1.8 (Translation of the drawing and the reference numerals are put on the end of this document.)

5.2 Grating Pattern Projection System Three-Dimensional Measurement

by Tohru Yoshizawa,
Department of Technology,
Tokyo University of
Agriculture and Technology

The grating pattern projection method is one of typical active measurements. An example of the optical systems is shown in Fig. 5.2.1. As seen in the figure, a grating pattern for use as a reference is projected onto an object to be measured, and the object is seen from an angle different from the projecting direction. Then, it is observed that the grating pattern is deformed according to the contour of the object (what is called a deformed grating image). That is, in case of a simple planar object, a linear grating pattern which is the same as its original pattern is observed. In case of a three-dimensional irregular object, an original grating pattern therefor deforms in accordance with the contour of the object, so that the pattern is looked curving. In fact, when a linear grating pattern (i.e., a reference grating) (which is obtained from a planar object as a reference) is superposed on the deformed grating image, contour lines due to so-called Moire fringes appear²⁾. At this point of time, the three-dimensional data are included in the deformed grating image which is one of the two images superposed on each other (because it is impossible to include the three-

dimensional data in the reference grating composed of the linear pattern). Therefore, the Moire fringes are not necessarily formed so as to obtain the contour data. The basic idea of the grating projection system is therefore that the three-dimensional contour of an object is obtained by directly analyzing this deformed grating image.

Fig. 5.2.1

Supposing that the above deformed grating image is taken with a CCD camera in such optical setup as shown in Fig. 5.2.1, point P (X, Y, Z) on the object corresponds to a point p (x, y) on the image-forming plane (viewing plane) of the camera. The coordinate (X, Y, Z) of point P on the object is determined by the following equations (as the simplest expression).

$$\begin{aligned} X &= (-b\sqrt{a^2 + b^2}x)/H \\ Y &= (mab\sqrt{a^2 + b^2} - yb^2)\tan\theta_N/H \\ Z &= \{ (ma^2\sqrt{a^2 + b^2} - yab)\tan\theta_N + y(a^2 + b^2) \}/H \end{aligned} \quad (1)$$

wherein

$$H = (ma\sqrt{a^2 + b^2} - yb)\tan\theta_N + mb\sqrt{a^2 + b^2} + ay.$$

Fig. 5.2.2

Fig. 5.2.3

In the equations, m is an enlargement ratio (or a reduction

ratio) for photographing; and θ_N is an angle formed between a fringe of order N and the projecting axis. In this connection, only one fringe with a different width is included as a reference fringe of $N = 0$ so as to recognize the order N . It is thought that the idea of the pattern-projection system as described above is to add such an active effect that, for example, in case of stereoscopic photography, marking by projecting a grating onto an object to be measured is done by building a grating in one of two cameras. As a definite example, a grating pattern was projected onto an object (a Daruma doll) as shown in Fig. 5.2.2(a) so as to form a deformed grating image shown in Fig. 5.2.2(b). An analysis was made on the deformation of the fringe pattern based on this image, so that the result shown in Fig. 5.2.3 (a) was obtained³⁾. In this state, the measuring points are limited on the fringes only.

Therefore, in case where the density of measuring points is too coarse, the grating to be projected is slightly shifted so as to increase the density of the measuring points. Thus, it is possible to obtain close measuring points as shown in Fig. 5.2.3 (b) (however, this is not always a clever method because the phase shift method has now come into wide use).

This method makes it possible to analyze, if only a grating pattern is projected on an object by any means and

a deformed grating image is obtained therefrom. Therefore, besides the method of projecting a substantive grating using white light, other methods may be possible. The most popular method is that interference fringes caused by laser beams are utilized for such a small object as shown in Fig. 5.2.4. The results of the contour analysis are shown in Fig. 5.2.5. On the other hand, Fig. 5.2.6 shows a four-diameter magnified model of a molar tooth on which interference fringes are projected. Such deformed grating images are taken in from several directions for analysis of the contour thereof. The results are shown in Fig. 5.2.7. The contours of the biting face, cross-section, etc. of the molar tooth are easily created. It is, of course, possible to create a surface model of a whole of the molar tooth as shown in Fig. 5.2.8 by integrally combining the data of such contours. It is known from this figure that smooth combination of the data is performed. Further, it is also possible to make a substantial model of the molar tooth by machine grinding as shown in Fig. 5.2.9 under computer control using such data.

Fig. 5.2.4

Fig. 5.2.5

Fig. 5.2.6

Fig. 5.2.7

Fig. 5.2.8

Fig. 5.2.9

Fig. 5.2.10

In the above grating pattern projection system, it is possible to create the contour of an object in a dynamic state (because it is sufficient if only one image can be frozen). For example, it becomes possible to create a deforming state of a vibrating disc (24 Hz) as shown in Fig. 5.2.10 by projecting a grating pattern onto the object with a stroboscope to form a deformed grating image.

When an image is measured by pattern projection or the like, it is needed to increase the density of measuring points on an object and eliminate influences of variation of the projecting light intensity, the pattern which the object initially has, and so on. It is effective to employ the phase shift method (fringe-scanning method) as described above so as to eliminate the above influences. In other words, a plural number of images (generally formed on 3 or 4 sheets) which are formed by shifting the phase of the projected fringe are used⁵⁾.

Suppose that a grating pattern having a sine transmission distribution is projected to an object, and that the intensity distribution $I(x)$ of a deformed grating image relative to a point x is determined by the following equation (2):

$$I(x) = A(x) + B(x) \cos[\phi(x) + \alpha] \quad (2)$$

wherein $A(x)$ is a bias component of the intensity distribution; $B(x)$ is a contrast component of the fringe; α is an initial phase; and $\phi(x)$ is a phase resulting from the irregularity of the contour of the object. It becomes possible to find the contour of the object based on the optical setup if only the phase $\phi(x)$ is known. For example, in the four-screen system, the grating is shifted by every $1/4$ pitch while α is changed to zero, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ and so on, so that images having intensity distributions I_0 , I_1 , I_2 , I_3 which correspond to the above gratings are introduced. Then, the phase distribution $\phi(x)$ is determined by the following equation (3) based on the equation (2).

$$\phi(x) = \tan^{-1} [I_3(x) - I_1(x)] / [I_0(x) - I_2(x)] \quad (3)$$

This facilitates the conversion of the resulting phase distribution of the fringes into contour data.

This process is definitely described with reference to Fig. 5.2.11. Fig. 5.2.11 (a) shows a fringe pattern which is projected to the face of a real person. It is desirable that the intensity distribution on this reference pattern as a prototype should have sine-wave-like intensity, in order to strictly apply the phase shift method. It is indicated that in case of a binary white-and-black pattern, the measuring result has cyclic small errors (which are easily known when observing its cross-sectional contour).

Analysis of the resulting deformed grating image (a) firstly provides a phase distribution (corresponding to the elevation of the contour) as seen in Fig. 5.2.11 (b). However, this result is folded back (namely, wrapped) at every one cycle. Therefore, it is necessary to sequentially connect these results while connecting the phases (unwrapping the fringes). The result of the phase connection as shown in Fig. 5.2.11 (c) is obtained anyway, although there arises several discussions on how to unwrap them. The observation of this result is the easiest way to know whether the measurement of the contour has been successfully done or not. This figure shows the data of the depth from the highest point to the lower portion by the variable density. This data of the depth is further converted into data of the contour, so that the three-dimensional coordinate values of the object can be obtained. The results obtained from this figure are shown in Fig. 5.2.23 put on the end of this chapter.

Fig. 5.2.11

To indicate the advantages of the phase-shifting system, for example, the mask of a doll which was painted white and the mask of a doll which was intentionally patterned with an oil paint were used as objects, and their contours were measured (by the grating projection method

which introduced the phase-shifting system). Fig. 5.2.12 shows the results of the measurement using four screens which display what does the whitened mask look like when phase-shifted by every 90 degrees. This figure shows that the measurement was performed at closer intervals than the intervals of the projected fringe pattern, and also that the irregularity of the contour of the mask was decided. Fig. 5.2.13 shows the results of the measurement of the patterned mask by the same method. It is apparent that the measurement was performed without the influence of the painted pattern on the projected fringes and that the same result as shown in Fig. 5.2.12 was obtained. It is necessary for the phase-shifting system that the fringes introduced should have a sine-wave-like intensity distribution. Otherwise, in case of projecting rectangular-wave grating, similar results to those of the sine-wave grating can be approximately obtained because of the shading effect. When the pitches of the grating are fine, an error is not so remarkable, but when the pitches of the grating are coarse, this approximation is not established, so that cyclic errors are caused, to which special attention must be paid⁶⁾. When a grating of small pitches is used, "phase jumping" occurs at a site where difference of elevation of an object is large, so that the connection of the contours is not successfully done.

Fig. 5.2.12

Fig. 5.2.13

The grating-projection system for profiling (GRASP) was first used for diagnosis of scoliosis⁴⁾, and it is practically used for various commercial fields such as making of clothes¹⁵⁾. Fig. 5.2.14 shows the results of the measurement of the contour of the grooves of a tire surface. In this case, the measurement is possible without special treatment on the surface of the tire (painting or the like). Fig. 5.2.15 shows an optical unit for a system for use in somatometry. As other practical application, this system is used for obtaining input data for CAD or CAM. Fig. 5.2.16 shows an example of clothes which is made based on data of the measurement of a human body using this measuring system (the data obtainable by this system are relative to the trunk of the body only but not to other portions of the body)¹⁶⁾. Fig. 5.2.17 shows a reduced model of a statue of Venus which is formed by measuring the body of the Venus statue using this system, converting the results into data for CAM, and forming the reduced model from a photocurable resin by the three-dimensional lithographic technique¹⁷⁾. Ultraviolet laser beams are sequentially irradiated and scanned so as to cure the liquid resin to form the model. The model on the left side

on the photograph is composed of the surface skin only.

Examples of the use of this system for the measurement of minute surface contours include the measurements of the broken section of a metal by tension, and the skin surface contour shown in Fig. 5.2.18 (which is an unusual example anyway). This is a trial to find the shapes and distribution of wrinkles around the corners of the eyes which were caused by aging¹⁸⁾. As a result, a portion which has ever been hard to measure can be measured in quite a short time without contacting it. Thus, data for the basis of developing cosmetics are now being collected.

Fig. 5.2.14

Fig. 5.2.15

Fig. 5.2.16

Fig. 5.2.17

Fig. 5.2.18

In the meantime, the most keen interest in the above image-measuring system is measuring precision, particularly precision in the depth direction. As apparent from the equation (1), the level of precision has connection with 1) an error due to a geometric parameter quantity in association with the alignment and setting of the optical system, 2) an error due to the aberration of the optical system, 3) constraint due to the resolution of a camera,

the number of pixels and the like, and other errors. For this reason, there is an idea of "the measuring precision is 0.5% of the size of a screen to be measured" which has been experimentally set up as one of deliberate criteria. However, it is very difficult to accurately check the measuring precision of a three-dimensional contour, and also there are various opinions on how to display it. Further, several discussions have been made on the grating projection system. As a result, it is recognized that the experimental examination for practical level has produced the idea of "a precision of 0.1% (2σ) of the size of a screen in the center portion of the screen measured". In order to have a higher level of precision, it seems necessary to improve the hardware or to divide the pixels by any means.

The pattern projection method, having been developed as above, recently has been achieved to a level of commercial production, and many systems which have been achieved based on similar principals are now being introduced into the market. The latest technical tendency is described below by picking up interesting examples from such systems¹⁹⁾.

Fig. 5.2.19 shows an example of COMET system (Steinbichler, Germany) which is used for analysis of a projected grating image. According to the material data,

it is said that the contour of an object can be computed by using not only relative values but also absolute coordinate positions (by introducing the idea of the trigonometrical survey). It is said that the precision of a measuring region of 180 x 240 mm is 0.1 mm in the depth direction.

Fig. 5.2.19

In case of OptoShape system of Massen (Germany) (see Fig. 5.2.20), the most remarkable feature rests in that a pattern is projected by using a liquid crystal grating. One of advantages thereof is that the phase of a pattern can be shifted without a mechanically moving part. We have experimentally known that an error in shift amount due to movement often arises when a grating or the like is moved by using a motor or a piezoelectric element. In this view, the use of liquid crystal grating makes it unnecessary to use such moving parts. In addition, the pattern projection method has a problem in that, depending on the contour of an object, the projected fringe pattern has too close intervals to distinguish them, or that the fringe is discontinued (in case of an object having high undulation) to make its corresponding relation indefinite. Therefore, it is thought that the use of a liquid crystal grating makes it possible to overcome the above problem by designing a pattern which has optimal intervals relative to

an object and projecting such a pattern to the object. It is said that the precision of a measuring head is 0.1 mm relative to a measuring region of 140 x 108 x 100 mm.

As described above, the use of a liquid crystal grating is excellent as an idea. However, there still remain two actual problems unsolved: one is that to what level a refined liquid crystal pattern can be created, and the other is that to what level the gradation of the liquid crystal grating can be improved. For the present, it is hard that a liquid crystal grating for use in a projector or the like can have a wide range of gradations corresponding to a wide range of voltage. To achieve this subject matter, it is demanded to develop an element suitable for such a purpose without using an existing liquid crystal device.

Fig. 5.2.20

Finally, there remains a subject matter of achieving measurement in a shorter time. Generally, the phase shift method is used for analysis of fringe by a computer. In many cases, the method using a plural number of images which are formed based on the temporal phase-shifting system is employed. On the other hand, to measure a dynamic object, it is also possible to introduce only one fringe image and perform spatial phase-shifting on the

image by computer-processing. We take the technique called "one-step phase-shifting" as an example of such a trial²⁰⁾.

This idea is effective in case where it is impossible to instantly introduce a plurality of images because an object thereof rapidly changes with the time as in case of measurement of fluid. If this idea is deduced, it becomes possible to measure a dynamic change of the contour of an object by employing the pattern projection method. Fig. 5.2.21 shows several of the results of measurement of changes of the contour of a vibrating disc with the time, wherein the results of such changes are taken at every $1/60$ sec.

The ultimate of time-shortening measurement reaches an idea of real time measurement. The real time measurement, in many cases, aims at processing by some hardware rather than processing by a software using a computer. The PROJECT D system (shown in Fig. 5.2.22) which has been developed last year by Carl Zeiss (Germany) applies the method of real time analysis of interference fringe which is developed for measurement of the contour of optics or the like, for instantly analyzing a projected pattern so as to obtain the contour of an object. According to this system, the resolution is $10\text{ }\mu\text{m}$ when the depth is 140 mm, and the time taken in measuring is only 40 m.sec. For better understanding of the present state of achieving real

time measurement, refer to another chapter in which it is described in more detail.

Once it has become possible to obtain three-dimensional coordinate values anyway as described above, then, it becomes important how attractively the result is displayed. It is quite tasteless to display only a wire-frame-like image, for example, as shown in Fig. 5.2.23(a). Thus, there are trials to paste such measured data with the same colors and textures as those of a real object. Fig. 5.2.23(b) shows one examples of such results in which the color data and surface texture of a real person are superposed on the data of (a). The resultant image is very realistic. In addition, it is, of course, possible to sequentially and freely rotate the resultant image or irradiate it with light from an optional direction for comparison²¹⁾.

In this chapter, the outline of the present state of the pattern projection system has been described. Products manufactured based on the above principals already have been put on the market, and it is expected that the three-dimensional measuring technique will establish its own field by further sophisticating the system in the near future.

Fig. 5.2.21

Fig. 5.2.22

Fig. 5.2.23

Reference Literature

- 1) W. Frobin, E. Hierholzer: Applications of Human Biostereometrics, SPIE Proc. 166, pp. 39-44 (1978)
- 2) Yoshizawa, Suzuki, Tashiro: O plus E, No. 87, pp. 56-61 (1987)
- 3) Kensaku Suzuki, Tohru Yoshizawa: Bulletin of the Precision Engineering Association, 53, 3, pp. 422-426 (1987)
- 4) T. Yoshizawa et al.: Surface Topography and Spinal Deformity, pp. 403-410 (Gustav Fischer Verlag, 1987)
- 5) Ryohei Komatsubara, Tohru Yoshizawa: Bulletin of the Precision Engineering Association, 55, 10, pp. 1817-1822 (1989)
- 6) Komatsubara, Katase, Yoshizawa: Bulletin of the Precision Engineering Association, 58, 7, pp. 1173-1178 (1992)
- 7) Hirosuke Satoh, Seiji Iguchi: Paper of the Electronic Communication Association, J680-D No. 3, pp. 369-375 (1985)
- 8) M. Takeda, K. Mutoh: Appl. Opt. 22, 24, pp. 3977-3982 (1983)
- 9) M. Suganuma, T. Yoshizawa: Opt. Engg. 30, 10, pp. 1529-1533 (1991)
- 10) J. Bruning et al.: Appl. Opt. 13, 10, pp. 2693-2703 (1974)
- 11) D. Malacara: Optical Shop Testing (2nd Ed.) (wiley,

- 1992) (which describes in detail the phase shift method)
- 12) V. Srinivasan, H. Liu, M. Halioua: Appl. Opt. 23, 18, pp.3105-3108 (1984)
- 13) Special edition of Super-Precision Surface Contour Measurement which refers to commercially available apparatus is included in "Optical Technique Contact", 26, 11 (1988)
- 14) Tajima, Iwakawa: Bulletin of the Electronic Communication Association J73-D-II, No. 3, pp.374-382 (1990)
- 15) Matsuyama, Uetake, Yoshimura, Komatsubara, Yanagisawa: Bulletin of the department of domestic science of Ohtsuma Women University, No. 26, pp. 77-85 (1992)
- 16) Etsuko Niwa: Idea of Clothe Designing by Computer Aiding (1-3) (the name of the bulletin and vol. No. are unknown)
- 17) Nagamori, Hirano, Satoh: O plus E, No. 133, pp.117-123 (1990)
- 18) An article of "Asahi News Paper" (October 30, 1990) or "TRIGGER", 10, 3, pp.54-55 (1991), Yukiko Kawaguchi, Osamu Kaneko, et al.: J. Soc. Cosmet. Chem. Japan, 28, 2 (1994), pp.153-162
- 19) Tohru Yoshizawa: O plus E: No. 202, pp.80-87 (1996)
- 20) R. Gu, T. Yoshizawa, Y. Otani: Optics and Lasers in Engineering, 21, 1-2 (1994), pp.61-75

21) Masayuki Yamamoto et al.: Bulletin of the Autumn
Meeting of the Precision Engineering Association (1997),
p.460

It is said that this system creates a three-dimensional contour by applying a laser beam to resin powder according to the data of two-dimensional slices of the contour of an object and curing the resin powder, and sequentially laminating the cured sections of the slices to form a three-dimensional contour. Further, such a three-dimensional contour is formed using ceramics, and also, there is a trial to form such a three-dimensional contour from a metallic substance by using a corpuscular beam instead of a laser beam. Recently, there is reported a further trial to form a three-dimensional contour with a higher strength by solidifying metal powder by the use of a laser beam. In addition, various systems for forming three-dimensional contours using liquid photocurable resins are proposed in both domestic and foreign countries. In the present state of the technique, it will be very easily achieved to send a three-dimensional facsimile formed by modeling a liquid photocurable resin. As data to be used, results based on not only virtual values but also found values of actual measurement can be used. For example, the contour of an object is formed by Moire fringe, and a resin is cured in conformity with the resultant form. Needless to say, it is of course possible to enlarge or reduce, or modify the contour of a mockup.

We are planning to publish several books with the theme of "Three-Dimensional Engineering" as one of "O plus E" series. In consideration of "three-dimension", there is a tendency to put importance on "three-dimensional display" or "three-dimensional measurement". However, these fields are having wider and wider ranges, and in association with this, importance of "three-dimensional processing" such as machine working is increasing. For this reason, this plan is intended to integrate various techniques of the relating fields and to attract public attention to the necessity to newly recognize "three-dimension" from various view points. From this point of view, we title this book "Three-dimensional Engineering", and venture to ask for public opinion by sending out "Optical Three-Dimensional Measurement" to the world, standing on our position that the use of light makes it possible to measure up to this level, firstly, in view of the three-dimensional measurement. It would be our pleasure if this book could contribute to your initial guidance to "Three-Dimensional Engineering".

OE Series

Three-Dimensional Engineering 1 - Optical Three-Dimensional
Measurement

First edition issued on March 8, 1993

Second revised edition issued on December 14, 1998

Edited by Tohru Yosizawa
Issued by Kaname Matsushita
Published by K.K. New Technique
Communications

Mail No. 169-0073, 2-16-13,
Hyakunin-cho, Shinjuku-ku, Tokyo-to
Telephone No. (03) 3371-0241
(Representative)

Translation of the Drawings

Fig. 5.1.8 Diffracted Light System Apparatus
(Tajima, Iwakawa)

1 = a measuring region, 2 = an infrared transmission filter,
3 = a xenon lamp, 4 = a collimator lens, 5 = a slit,
6 = a diffraction grating, 7 = a cylindrical lens,
8 = an image pick-up plane (a x-y plane), 9 = a CCD camera,
10 = (reference position), 11 = a computer,
and 12 = a frame memory.

Fig. 5.2.1 Principle of Grating Projection Method

1 = an object, 2 = a CCD camera, 3 = a projector,
4 = a grating

Fig. 5.2.2 Object (Daruma Doll) and
Image of Deformed Grating

- (a) An object (daruma doll)
- (b) Image of deformed grating (the thick band is a reference)

Fig. 5.2.3 Display of Measurement Results

- (a) Fringe of 8.9 mm interval on the reference face
- (b) Projected fringe having closer intervals by shifting the grating by every $1/4$ pitch

Fig. 5.2.4 Image of Deformed Grating Due to Interference
Fringe (10-cent coin with 17.8 mm diameter)

Fig. 5.2.5 Analysis of Surface Contour of Coin

(a) Display of a wire frame

(b) Section A

1 = height, and 2 = a position (mm)

(c) Section B

1 = height, and 2 = a position (mm)

Fig. 5.2.6 Image of deformed grating obtained by projecting interference fringe onto a molar tooth (a model magnified 4 diameters)

Fig. 5.2.7 Analysis of the contour of a molar tooth (a model magnified 4 diameters)

(a) the contour of a cross-section

(b) the contour of a side

1 = a cut position

(c) the contour of a biting face

Fig. 5.2.8 Surface Model of Molar Tooth

Fig. 5.2.9 Restoration of a biting face by machine-grinding

Fig. 5.2.10 Vibrating disc (the left) and contour lines (the right)
The number of vibration is 24 Hz.

Fig. 5.2.11 Process of Analysis of Image (the final results are shown in Fig. 5.2.23.)

(a) Image of deformed grating

- (b) Result of phase computation
- (c) Result of phase connection (display of the density)

Fig. 5.2.12 Measurement of Mask of Kewpie Doll
(Painted White)

- (a) Whitened mask
- (b) Display of a wire frame as the result of measurement

Fig. 5.2.13 Measurement of Mask of Kewpie Doll
(Patterned with Color Oil Paints)

- (a) Mask intently patterned
- (b) Display of a wire frame as the result of measurement

Fig. 5.2.14 Measurement of Surface of Tire

- (a) Display of a wire frame
- (b) Contour of the surface grooves
1 = height, and 2 = a position (mm)

Fig. 5.2.15 Equipment for Grating-Projection System for
Profiling (GRASP)

Fig. 5.2.16 Application to Making of Clothes (Niwa)

- (a) Basic model created by the grating-projection system
- (b) Paper model
- (c) Dress made by decorative designing

Fig. 5.2.17 Formation of Model Using Photocurable Resin
(Mitsui Zosen)

Fig. 5.2.18 Measurement of Wrinkles of Eye Corner
(Shiseido)

- (a) Display of a wire frame as the result of measurement of wrinkles
- (b) Profile of the section

Fig. 5.2.19 COMET System (Steinbichler)

- (a) External appearance of a measuring section
- (b) Setup of optical system
 - 1 = a lens, 2 = a CCD camera, 3 = a light source,
 - 4 = a grating, 5 = a lens, and 6 = an object

Fig. 5.2.20 Introduction of Image Using OptoShape System
(Massen)

- 1 = an image of deformed grating, 2 = a bias image,
- 3 = a contrast image, 4 = a result of computation of the phase, 5 = a mask, and 6 = a final phase image.

Fig. 5.2.21 Example of Measurement of Vibrating Disc

- 1 = a rubber plate, and 2 = a linear motor.

Fig. 5.2.22 PROJECT D System (Zeiss)

Fig. 5.2.23 Superposition of Texture on Three-Dimensional Coordinates

- (a) Display of a wire frame
- (b) Result of superposition of colors and texture